

控制与决策

Control and Decision

基于TOPSIS方法改进的多属性决策模型:最小化偏好反转

王宗润, 汤小芸

引用本文:

王宗润, 汤小芸. 基于TOPSIS方法改进的多属性决策模型:最小化偏好反转[J]. *控制与决策*, 2021, 36(1): 216–225.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0536>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[考虑个体累积共识贡献的犹豫模糊语言自适应共识模型](#)

Adaptive consensus model with hesitant fuzzy linguistic information considering individual cumulative consensus contribution

控制与决策. 2021, 36(1): 187–195 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0556>

[无人飞行器航迹方案的VIKOR择优评价](#)

Unmanned aerial vehicle path scheme optimal evaluation based–VIKOR

控制与决策. 2020, 35(12): 2950–2958 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0415>

[乡村旅游开发适宜性等级评价TOPSIS方法](#)

TOPSIS method of suitability grade assessment for rural tourism development

控制与决策. 2020, 35(11): 2619–2625 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1565>

[考虑时间序列的动态大群体应急决策方法](#)

Dynamic large group emergency decision–making method considering time series

控制与决策. 2020, 35(11): 2609–2618 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0088>

[基于前景理论和模糊理论的在线多属性采购拍卖 供应商选择决策](#)

Decision method of supplier selection for online multi–attribute procurement auction based on prospect theory and fuzzy theory

控制与决策. 2020, 35(11): 2637–2645 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1768>

基于TOPSIS方法改进的多属性决策模型:最小化偏好反转

王宗润[†], 汤小芸

(中南大学 商学院, 长沙 430081)

摘要: 针对多属性决策方法 (MCDM) 中出现的偏好反转问题, 提出一种基于 TOPSIS 方法改进的 MCDM 模型. 该模型用 MAX 法代替矢量法对数据进行标准化处理, 并根据备选方案的相似距离衡量每个选项的优劣性. 这种基于距离计算的综合属性评价方法不仅计算简单, 而且可以较好地测度选项间的差异, 增强决策结果的准确性. 同时, 将该模型计算的结果与 SAW、AHP、TOPSIS、VIKOR 方法进行对比分析, 发现只存在原选项时, 所提出的模型与 SAW、AHP 方法的排序结果一致, 而当添加或删除某个选项时, SAW、AHP、TOPSIS、VIKOR 方法均会产生不同程度的偏好反转现象, 而所提出的基于 TOPSIS 改进的模型可以保持选项的相对顺序不变, 表明所提出的模型是有效的, 且在避免偏好反转问题时较 SAW、AHP、TOPSIS、VIKOR 方法具有一定的优越性和可靠性.

关键词: 多属性决策; 偏好反转; TOPSIS; 相似距离; SAW; VIKOR

中图分类号: C394

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.0536

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 王宗润, 汤小芸. 基于 TOPSIS 方法改进的多属性决策模型: 最小化偏好反转 [J]. 控制与决策, 2021, 36(1): 216-225.

Modified MCDM model based on TOPSIS method: Minimizing preference reversal

WANG Zong-run[†], TANG Xiao-yun

(Business School, Central South University, Changsha 430081, China)

Abstract: For preference reversal frequently occurring in the multiple criteria decision making (MCDM), a modified MCDM model based on the TOPSIS method is proposed, in which the vector normalization method is replaced by the MAX method and the similarity distance of alternatives is used to measure the advantages and disadvantages of each option. This method is not only simple to calculate, but also can better measure the differences among alternatives, making the decision result more accurate. Comparing the results of the modified model with those of SAW, AHP, TOPSIS and VIKOR methods, it is found that when there are only original options, the ranking results of the model proposed are consistent with those of SAW, AHP methods. When an option is added or deleted, other methods will produce different degrees of preference reversal, but the modified model can keep the relative rank of alternatives, showing the proposed model is more effective and reliable in avoiding preference reversal compared with SAW, AHP, TOPSIS and VIKOR methods.

Keywords: multiple criteria decision making; preference reversal; TOPSIS; similarity distance; SAW; VIKOR

0 引言

随着经济社会的高速发展, 人们面临的决策问题越来越多, 决策情境也越来越复杂, 这就要求决策者必须科学决策. 多属性决策 (multiple criteria decision making, MCDM) 虽然为人们科学决策提供了理论依据, 但这些方法都存在不同程度的偏好反转问题^[1-2]. 偏好反转是指在原有备选方案中加入或删除某个选项后各选项的排序结果发生改变的现象, 即新加入或删除的选项会影响人们的决策^[3-4]. 由于决

策问题纷繁复杂变幻莫测, 决策者在某些情况下不可避免地需要加入新方案或者删除不可获得的旧方案, 而偏好反转现象的存在表明决策结果的不稳定性以及决策方法的弱有效性, 直接应用这些存在问题的方法和模型处理实际中的问题, 难免会造成决策失误甚至带来更大损失, 因此解决偏好反转问题具有重要意义.

Macharis 等^[5]认为, 只有加入的选项为某个选项的复制品或近似复制品时才会出现偏好反转现

收稿日期: 2019-04-26; 修回日期: 2019-08-07.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71631008).

[†]通讯作者. E-mail: zrwang0209@sina.com.

象. 后来学者发现加入无关选项也会导致最终排序结果发生变化^[6]. 关于偏好反转现象产生的原因, 学者进行了深入的研究, 其中最主要的原因是标准化方法, 由于各个备选项的决策标准不统一, 初始时需要消除各决策标准的量纲差异, 即标准化过程. 而标准化会破坏各个备选方案之间的独立性, 使其产生某种内在联系^[7-8]. 尽管 Barzilai 等^[9]指出没有标准化方法可以避免排序反转, 且 Senouci 等^[10]也提出了一些新的标准化方法克服 TOPSIS 中的排序反转问题, 但没有证据表明新方法较传统 TOPSIS 方法在解决实际问题中更优. Jahan 等^[11]指出, 虽然 MCDM 方法中的标准化方法差异不大, 但这些微妙的差异可能会对决策产生非常显著的效果, 并证明了矢量标准化在排序和处理权重敏感性问题上是最可靠的. 还有学者认为, 指标权重的确定也可能引起逆序^[12-13]. 同时, 信息的不一致性也是导致偏好反转的重要原因^[14], 信息的一致性要求决策者必须同时考虑所有的选项, 而当加入或删除备选项时决策者不会根据新信息来调整他们对选项的评估, 从而导致新信息与原信息不一致, 进而造成排序反转.

尽管有些研究者认为偏好反转是决策时的一个正常现象^[15], 但大多数学者认为偏好反转不利于决策者决策. Anbaroglu 等^[16]认为排序反转问题是 MCDM 领域中一个很严重的缺陷, 它可能导致决策者忽视备选方案之间的差异. Bairagi 等^[1]指出偏好反转问题的存在使得选择过程变得异常复杂, 换句话说, 该现象的存在表明了 MCDM 方法的不可靠性. Salem 等^[17]也指出, 该现象的存在可能会使决策者放弃那些引起偏好反转的决策方法而采用较稳定的决策工具, 应该最小化这种现象^[18].

偏好反转现象最早在 AHP 方法中被发现, 随后提出 BG-AHP 模型克服偏好反转现象, 即选项的决策权重需要根据最大的属性值而不是属性值之和来确定. 还有学者通过数值求解发现, 几何平均聚集法可以有效避免 AHP 中的偏好反转问题. 尽管如此, AHP 方法仍然是所有 MCDM 方法中最饱受质疑的决策方法^[19]. SAW 方法是最简单的决策方法, 通过线性加权得出各个备选项的综合评价, 从而选出最优的选项. 与 AHP 方法一样, SAW 方法也会出现偏好反转现象, 但是很少有学者针对 SAW 方法提出改进模型克服偏好反转现象. TOPSIS 作为目前最流行的决策方法, 被广泛用于经济、社会、生产、管理等各个领域. Behzadian 等^[20]通过梳理 2000 年以来的文献发现包含 103 种期刊在内的 266 篇文献都采用 TOPSIS 方

法来处理问题, 其应用范围涉及 9 个领域. Salih 等^[21]对 2007 年~2017 年期间关于模糊 TOPSIS 方法的 170 篇文献进行了整合. 此外, 学者们还提出了各种混合模型, 如 AHP-TOPSIS^[22]、AHP-TOPSIS-QFD^[23]、TOPSIS-VIKOR^[24]、DEA-TOPSIS^[25] 等. 但大多数研究仅仅应用 TOPSIS 和模糊 TOPSIS 方法解决各种决策问题, 少数研究基于 TOPSIS 方法和模糊 TOPSIS 方法进行了改进或是同其他决策方法相结合, 然而并没有说明改进的方法较原 TOPSIS 方法或模糊 TOPSIS 方法的优越性, 且很少有学者考虑到 TOPSIS 方法中的偏好反转现象. 目前, 虽然关于 TOPSIS 方法的偏好反转研究已经有了很大的增长, 但是相对于其他方法而言还是相对较少^[26]. Ren 等^[27]针对 TOPSIS 方法中的偏好反转问题提出了 M-TOPSIS 方法, 即选择收益选项的最小值和成本选项的最大值作为参考点, 通过计算每个选项到该参考点的距离判断各选项的优劣, 距离越近, 选项越优. García-Cascales 通过改变原 TOPSIS 的标准化方法达到避免偏好反转问题, 但该方法同原 TOPSIS 方法排序结果相差较大, 无法判断新方法的有效性. Lahby 等^[28]提出了加强版 TOPSIS 方法, 并认为这种新的 TOPSIS 可以降低偏好反转问题且优于 SAW 和 TOPSIS 方法. Dezert 等^[29]将信念函数与 TOPSIS 方法结合起来解决排序反转问题, 实际上该方法在不同情境下仍会出现逆转问题. Senouci 等^[10]分析了 4 种标准化方法对偏好反转的影响. Wang 等^[30]结合 SAW、TOPSIS 和 GRA 提出一种混合式 MCDM 方法最小化偏好反转现象, 该方法的特点是采用实验设计技术确定属性权重, 结合不同的 MCDM 评价方法构建混合 MCDM 的决策模型. 反观国内, 研究 TOPSIS 方法中偏好反转问题的学者更少. 陈伟^[31]针对 TOPSIS 中的偏好反转现象提出了 R-TOPSIS 模型, 用绝对理想解代替相对理想解进而达到避免偏好反转问题. 李保珍等^[32]根据真实的消费数据和产品属性数据确定属性权重, 并采用极差变换进行标准化处理, 确定正负理想解进而消除 TOPSIS 方法中的偏好反转问题.

综上所述, 本文基于 TOPSIS 改进数据标准化方式, 并改进相似度计算方式: 引入选项相似性概念, 采用线性距离衡量选项间的相似性, 以此构建新的多属性决策方法, 克服实际生活中的偏好反转问题. 本文的创新点在于: 1) 采用 MAX 标准化方法只涉及一个选项, 选项间的依赖性减弱, 而原 TOPSIS 方法中的矢量标准法涉及全部选项, 选项间的依赖性增强, 更容易产生偏好反转. 2) 借鉴 Guo 等^[33]用过去贷款与新

贷款违约距离测度信用风险的做法,将最优选项作为参考点,其他选项到最优选项的距离越近,表明两个选项越相似,选项表现的也越优.通过线性加权方法即可得到每个选项距离最优选项的加权距离,加权距离越小,选项越优,这是因为加权距离越小,表明该选项与最优选项的距离越近,即最相似,故最优.之前也有学者采用Mikows距离,包括曼哈顿($p = 1$)、欧几里德($P = 2$)和切比雪夫($P = \infty$)^[34]来克服TOPSIS中的偏好反转问题,但没能确定哪种距离最优.这也是本文模型的优势所在.3) 本文选取大量经典文献中的决策方案验证该模型在防止偏好反转中的可行性和有效性,并与SAW、TOPSIS、AHP、VIKOR模型进行对比.结果表明,上述模型与SAW、TOPSIS、AHP、VIKOR模型相比可以有效防止偏好反转现象,且可以最小化偏好反转现象.

1 基于TOPSIS方法改进的MCDM模型

经典的TOPSIS方法于1981年首次提出,又称优劣解距离法.该方法包含两个基本概念:正理想解PIS和负理想解NIS.通过计算每个备选方案与理想方案的接近程度对各个选项进行排序,若备选方案最靠近最优解同时又最远离最劣解,则为最优选项,否则不为最优.针对标准TOPSIS方法中出现的偏好反转现象,当前研究工作主要集中在对备选方案属性重要性和备选方案属性值的处理以及对相似度计算公式的改进^[35].本文通过同时改变标准化方法以及相似度计算公式达到减弱偏好反转现象的目的,之所以可以有效避免偏好反转问题,主要原因是该方法将正负理想点固定,只要每个选项间存在差异,则每个选项到最优选项的距离是唯一确定的,因此排序也是唯一确定的.

原TOPSIS方法分为以下步骤.

step 1: 构建决策问题. 假设有 m 个备选方案 A_i ($i = 1, 2, \dots, m$), 每个备选方案有 n 个决策标准 C_j ($j = 1, 2, \dots, n$), 其属性值用 x_{ij} 表示 ($i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$), 决策者需要根据决策标准在众多备选方案中选择一个最优选项, 这里的最优选项指综合

意义上的最优.

step 2: 构建决策矩阵如表1所示.

step 3: 对数据进行标准化处理. 由于决策标准不同导致数据的量纲也不一定相同, 为了统一标准, 需要对数据进行标准化处理, 从而可以根据单一标准进行比较. TOPSIS方法采用矢量法进行标准化处理, 有

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\left(\sum_{k=1}^m x_{kj}^2\right)}}$$

$$i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n. \quad (1)$$

step 4: 计算加权属性值

$$v_{ij} = w_j \times r_{ij}, i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n; \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n w_j = 1. \quad (3)$$

step 5: 确定正理想解和负理想解

$$A^+ = (v_1^+ \dots v_n^+) = (\max_i v_{ij}, j \in J)(\min_i v_{ij}, j \in J'); \quad (4)$$

$$A^- = (v_1^- \dots v_n^-) = (\min_i v_{ij}, j \in J)(\max_i v_{ij}, j \in J'). \quad (5)$$

step 6: 计算各备选方案与正负理想值的距离. 每个选项与正理想解PIS的距离为

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2}, i = 1, 2, \dots, m; \quad (6)$$

每个选项与负理想解NIS的距离为

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}, i = 1, 2, \dots, m. \quad (7)$$

step 7: 计算各备选方案与理想解的相对接近度并对各备选方案进行排序, 有

$$R_i = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+}, i = 1, 2, \dots, m. \quad (8)$$

如果 $R_i = 1$, 则有 $A_i = A^+$; 如果 $R_i = 0$, 则有 $A_i = A^-$. R_i 越接近于 1, 表明该选项距离正理想解越近, 从而该选项越优.

本文提出的模型是在TOPSIS方法基础上进一步改进后的多属性决策方法. 与TOPSIS方法的主要区别在于: 1) 由原来的矢量归一化方法改变为MAX方法; 2) 引入选项相似性概念, 改变距离的计算方法, 使得变换后的属性值可以直接进行线性运算. 同时, 本文提出的方法只考虑了正理想解, 进一步简化了决策过程, 这是因为特定问题下决策标准的范围对于所有备选方案都是相同的. 下面将详细介绍本文所提

表1 决策矩阵

权重 决策标准	w_1 C_1	w_2 C_2	...	w_j C_j	...	w_n C_n
A_1	x_{11}	x_{12}	...	x_{1j}	...	x_{1n}
A_2	x_{21}	x_{22}	...	x_{2j}	...	x_{2n}
\vdots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\ddots	\vdots
A_i	x_{i1}	x_{i2}	...	x_{ij}	...	x_{in}
\vdots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\ddots	\vdots
A_m	x_{m1}	x_{m2}	...	x_{mj}	...	x_{mn}

出的模型.

step 1 和 step 2 同 TOPSIS 方法.

step 3: 采用 MAX 标准化方法, 有

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_{ij}^{\max}}, i = 1, 2, \dots, m, j \in J; \quad (9)$$

$$r_{ij} = 1 - \frac{x_{ij}}{x_{ij}^{\max}}, i = 1, 2, \dots, m, j \in J'. \quad (10)$$

其中: J 为与收益相关属性, J' 为与成本相关属性.

step 4: 计算加权属性值

$$v_{ij} = w_j r_{ij}, i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n; \quad (11)$$

$$\sum_{j=1}^n w_j = 1. \quad (12)$$

step 5: 确定参考点

$$v_j^+ = \max_i v_{ij}, j \in J, i = 1, 2, \dots, m; \quad (13)$$

$$v_j^- = \min_i v_{ij}, j \in J', i = 1, 2, \dots, m. \quad (14)$$

step 6: 计算各属性的相似距离并对各备选方案进行排序. 由于决策的选项之间存在相似性, 可以将加权属性值最大的选项与各选项间的距离差作为其新的属性值, 比较大小选出最优, 具体计算如下. 对于收益属性, 有

$$D_i^+ = v_j^+ - v_{ij}; \quad (15)$$

对于成本属性, 有

$$D_i^- = v_{ij} - v_j^-. \quad (16)$$

每个选项与最优选项的距离差为

$$DV_i = \beta \times \sum_{j=1}^J D_i^+ + (1 - \beta) \times \sum_{j=1}^{J'} D_i^-. \quad (17)$$

其中: β 为决策者对收益和成本的偏好, $\beta > 0.5$ 表示决策者对收益更关注, $\beta = 0.5$ 表示决策者对收益和成本关注程度相当, $\beta < 0.5$ 表示决策者对成本更关注, 本文 β 取 0.5. DV_i 越小, 该选项各属性值距离最优属性值越近, 该选项也越优; DV_i 越大, 该选项各个属性值距离最优属性值越远, 该选项也越糟糕.

2 实证检验模型的有效性

2.1 偏好反转现象实例

偏好反转现象于 1983 年在研究 AHP 方法中首次观察到, 它表明各方案之间存在依赖性, 加入或删除某个选项会改变备选方案间的相对位置. 下面列举了前人文献中在运用 SAW、TOPSIS、AHP、VIKOR 方法解决问题时出现偏好反转现象的实例.

实例1 SAW 和 TOPSIS 方法偏好反转问题^[7].

如表 2 所示, 决策者需要根据上述 4 个收益属性 (收益属性的权重分别为 1/6、1/3、1/3、1/6) 对 4 个

备选项进行排序, 采用 SAW 方法时, 选项 $A_3 > A_2 > A_4 > A_1$, 此时由于之前的 A_4 选项不可获得需要删除, $A_2 > A_3 > A_1$, 与原排序相比 A_2 与 A_3 顺序发生了逆转; 相反, 若还有备选项 A_5 之前因为疏忽未考虑到而需要重新添加到原备选方案, 则 $A_3 > A_4 > A_2 > A_1 > A_5$, 与原排序相比 A_2 与 A_4 顺序发生了逆转.

表 2 SAW 和 TOPSIS 方法偏好反转问题

权重 决策标准	1/6 C_1	1/3 C_2	1/3 C_3	1/6 C_4	SAW 方法 排序	TOPSIS 排序
A_1	36	42	43	70	4	3
A_2	25	50	45	80	2	1
A_3	28	45	50	75	1	2
A_4	24	40	47	100	3	4
A_1	36	42	43	70	3	3
A_2	25	50	45	80	1	2
A_3	28	45	50	75	2	1
A_1	36	42	43	70	4	4
A_2	25	50	45	80	3	2
A_3	28	45	50	75	1	1
A_4	24	40	47	100	2	3
A_5	30	30	45	80	5	5

同样地, 采用 TOPSIS 方法时, 选项 $A_2 > A_3 > A_1 > A_4$, 此时由于之前的 A_4 选项不可获得需要删除, $A_3 > A_2 > A_1$, 与原排序相比 A_2 与 A_3 顺序发生了逆转; 相反, 如果还有备选项 A_5 之前因为疏忽未考虑到而需要重新添加到原备选方案中时, $A_3 > A_2 > A_4 > A_1 > A_5$, 与原排序相比 A_2 与 A_3 、 A_1 与 A_4 顺序都发生了逆转.

实例2 AHP 偏好反转问题^[36].

如表 3 所示, 决策者需要根据上述 4 个收益属性 (收益属性的权重分别为 1/4、1/4、1/4、1/4) 对 3 个备选项进行排序, 采用 AHP 方法时, 选项 $A_3 > A_2 > A_1$, 由于备选项 A_4 之前因为疏忽未考虑到而需要重新添加到原备选方案, $A_1 > A_3 = A_4 > A_2$, 与原排序相比 A_1 与 A_3 顺序发生了逆转. 当删除选项 A_3 时, 有 $A_1 > A_2$, 与原排序相反.

表 3 AHP 方法中的偏好反转问题

权重 决策标准	1/4 C_1	1/4 C_2	1/4 C_3	1/4 C_4	AHP 方法 排序
A_1	1	9	1	3	3
A_2	9	1	9	1	2
A_3	8	1	4	5	1
A_1	1	9	1	3	3
A_2	9	1	9	1	2
A_3	8	1	4	5	1
A_4	4	1	8	5	2
A_1	1	9	1	3	3
A_2	9	1	9	1	2

实例3 VIKOR 方法偏好反转问题^[37].

Serafim Opricovic 根据 Profit、Costs、Total energy produced、Peak energy produced、Number of homes to

be relocated、Area flooded by reservoirs、Number of villages to displace、Environmental protection这8个标准对Drina水域上 $A_1 \sim A_5$ 选项进行排序. 如表4所示, 各个决策标准的权重均为 $1/8$, 采用VIKOR方法时, 选项 $A_5 > A_3 > A_4 > A_2 > A_1$, 此时由于备选项

A_6 之前因为疏忽未考虑到而需要重新添加到原备选方案, 有 $A_5 > A_3 > A_6 > A_4 > A_1 > A_2$, 与原排序相比 A_1 与 A_2 顺序发生了逆转. 相反, 如果之前的 A_5 选项不可获得需要删除, 则 $A_4 > A_3 > A_2 > A_1$, 与原排序相比 A_4 与 A_3 顺序发生了逆转.

表4 VIKOR方法中的偏好反转问题

属性	+	+	+	+	-	-	-	-	VIKOR方法
属性权重	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	排序
决策标准	Profit	Environmental	Total	Peak	homes	Area	villages	Costs	
A_1	4184.3	2.41	407.2	251	195	244	15	2914	5
A_2	5211.9	1.41	501.7	308.3	282	346	21	3630	4
A_3	5021.3	4.42	504	278.6	12	56	3	3920.5	2
A_4	5566.1	3.36	559.5	335.3	167	268	16	3957.9	3
A_5	5060.5	4.04	514.1	284.2	69	90	7	3293.5	1
A_1	4184.3	2.41	407.2	251	195	244	15	2914	5
A_2	5211.9	1.41	501.7	308.3	282	346	21	3630	6
A_3	5021.3	4.42	504	278.6	12	56	3	3920.5	2
A_4	5566.1	3.36	559.5	335.3	167	268	16	3957.9	4
A_5	5060.5	4.04	514.1	284.2	69	90	7	3293.5	1
A_6	4317.9	4.36	432.8	239.3	12	55	3	2925.9	3
A_1	4184.3	2.41	407.2	251	195	244	15	2914	4
A_2	5211.9	1.41	501.7	308.3	282	346	21	3630	3
A_3	5021.3	4.42	504	278.6	12	56	3	3920.5	2
A_4	5566.1	3.36	559.5	335.3	167	268	16	3957.9	1

表5 本文提出的模型、SAW、TOPSIS对比分析

属性	-	+	-	+	+	+	加入 A'_3 前排序	加入 A'_3 后			
属性权重	1/6	1/6	1/6	1/6	1/6	1/6		d_i^+	d_i^-	R_i	排序
决策标准	Flow distance	Adjacency score	Shape ratio	Flexibility	Accessibility	Maintenance					
A_1	185.95	8	8.28	0.0494	0.0294	0.013	17	0.1178	0.0344	0.2261	18
A_2	207.37	9	3.75	0.0494	0.0147	0.0519	8	0.1077	0.0572	0.3468	12
A_3	206.38	8	7.85	0.37	0.0147	0.0519	15	0.0865	0.0853	0.4965	5
A_4	189.66	8	8.28	0.37	0.0147	0.0519	16	0.087	0.0852	0.4948	7
A_5	211.46	8	7.71	0.0617	0.0147	0.039	14	0.1125	0.038	0.2525	17
A_6	264.07	5	2.07	0.0494	0.0147	0.0519	9	0.1109	0.0599	0.3506	11
A_7	228	8	14	0.247	0.0735	0.0649	13	0.0789	0.0698	0.4696	8
A_8	185.59	9	6.25	0.037	0.0441	0.039	12	0.1041	0.0489	0.3194	15
A_9	185.59	9	7.85	0.0741	0.0441	0.0519	6	0.0966	0.0487	0.3354	13
A_{10}	236.15	8	7.85	0.0741	0.0588	0.0649	5	0.0898	0.0539	0.375	10
A_{11}	183.18	8	2	0.0864	0.1029	0.0909	1	0.0666	0.0939	0.5849	2
A_{12}	204.18	8	13.3	0.037	0.0588	0.026	18	0.1151	0.0331	0.2234	19
A_{13}	225.26	8	8.14	0.247	0.0735	0.0519	10	0.0681	0.0715	0.5123	4
A_{14}	202.82	8	8	0.0247	0.0588	0.0519	11	0.1005	0.0487	0.3266	14
A_{15}	170.14	9	8.28	0.0864	0.1176	0.1169	2	0.0684	0.0983	0.5898	1
A_{16}	216.38	9	7.71	0.0741	0.0735	0.0519	4	0.0884	0.0566	0.3901	9
A_{17}	179.8	8	10.3	0.0988	0.1324	0.0909	3	0.0723	0.0915	0.5587	3
A_{18}	185.75	10	10.16	0.0741	0.0588	0.039	7	0.0994	0.0462	0.3173	16
A'_3	206.38	8	7.85	0.37	0.0147	0.0519	-	0.0865	0.0853	0.4965	5

实例4 TOPSIS方法偏好反转问题^[30].

为了排除选项数量对偏好反转现象的影响, 选取文献[30]中的实例. 该实例要求决策者根据6个决策标准: Flow distance、Adjacency score、Shape ratio、

Flexibility、Accessibility、Maintenance对18个设施布局方案进行排序, 每个决策标准的权重为 $1/6$. 如表5所示, A'_3 为备选方案 A_3 的复制品, 加入 A'_3 前, 备选方案排序为 $A_{11} > A_{15} > A_{17} > A_{16} > A_{10} > A_9 >$

$A_{18} > A_2 > A_6 > A_{13} > A_{14} > A_8 > A_7 > A_5 > A_3 > A_4 > A_1 > A_{12}$; 加入 A'_3 后, 排序为 $A_{15} > A_{11} > A_{17} > A_{13} > A_3 = A'_3 > A_4 > A_7 > A_{16} > A_{10} > A_6 > A_2 > A_9 > A_4 > A_8 > A_5 > A_1 > A_{12}$, 与原排序相比, 大部分选项排序都发生了逆转, 例如 A_{11} 与 A_{15} 、 A_{13} 与 A_{16} 、 A_4 与 A_6 、 A_2 与 A_9 、 A_3 与 A_5 等.

2.2 模型有效性证明

MCDM模型的优劣在于它可以很好地应用到实际生活中, 可以在给定的众多备选方案中按一定条件选出最有利于决策的选项. 除了精准排序外, 实际生活中时常需要增添或删除选项, 这也意味着不可避免会发生偏好反转现象, 因此评价MCDM模型好坏的另一个标准是它能否不改变选项的排序或保持所有选项的相对排序. 如果同时满足上述两个标准, 则可以认为该模型较其他模型具有一定的优越性. 为了表明所提出模型是可靠的和准确的, 本节将采用该模型分析上述偏好反转的实例, 并与其他模型, 如: AHP、TOPSIS、SAW、VIKOR进行对比分析.

检验实例1 如表2所示, 决策者需要根据 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 这4个标准在 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 中选择最优项. 由于所有选项只涉及优势属性, 只看加权归一化后的最大值, 由式(15)和(17)可得各个选项与最优选项的距离DV, 并由此对各选项进行排序, 结果如表6所示. 加入选项 A_5 和删除选项 A_4 后, 根据所提出的模型进行计算, 结果如表7和表8所示.

表6 各属性值与最优选项的距离差(实例1)

	V_1	V_2	V_3	V_4	DV_i	排序
A_1	0	0.0533	0.0467	0.0500	0.1500	4
A_2	0.0509	0	0.0333	0.0333	0.1176	2
A_3	0.0370	0.0333	0	0.0417	0.1120	1
A_4	0.0556	0.0667	0.0200	0	0.1422	3

表7 加入选项 A_5 后各属性值与最优选项的距离差

	V_1	V_2	V_3	V_4	DV_i	排序
A_1	0	0.0533	0.0467	0.0500	0.1500	4
A_2	0.0509	0	0.0333	0.0333	0.1176	2
A_3	0.0370	0.0333	0	0.0417	0.1120	1
A_4	0.0556	0.0667	0.0200	0	0.1422	3
A_5	0.0278	0.1333	0.0333	0.0333	0.2278	5

表8 删除选项 A_4 后各属性值与最优选项的距离差

	V_1	V_2	V_3	V_4	DV_i	排序
A_1	0	0.0533	0.0467	0.0208	0.1208	3
A_2	0.0509	0	0.0333	0	0.0843	2
A_3	0.037	0.0333	0	0.0104	0.0808	1

综合上述结果, 对所提出模型、SAW和TOPSIS方法进行对比分析, 结果如表9所示. 由表9可见, 当只存在选项 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 时, 决策者采用SAW方法和所提出方法进行决策结果都一样, 即 $A_3 > A_2 > A_4 > A_1$. 当删除选项 A_4 后, 采用SAW方法和TOPSIS方法都会使 A_2 与 A_3 顺序发生逆转, 而采用本文所提出方法不会出现偏好反转问题, 选项的排序保持不变. 当加入选项 A_5 后, 采用SAW方法会改变 A_2 与 A_4 的顺序, 采用TOPSIS方法则会同时改变 A_2 与 A_3 、 A_1 与 A_4 的顺序, 而采用所提出模型丝毫不受增添或删除选项的干扰, 可以保持原先排序相对不变.

表9 所提出模型与SAW、TOPSIS对比分析

权重	1/6	1/3	1/3	1/6	SAW方法	TOPSIS	所提出模型
决策标准	C_1	C_2	C_3	C_4	排序	排序	排序
A_1	36	42	43	70	4	3	4
A_2	25	50	45	80	2	1	2
A_3	28	45	50	75	1	2	1
A_4	24	40	47	100	3	4	3
A_1	36	42	43	70	3	3	3
A_2	25	50	45	80	1	2	2
A_3	28	45	50	75	2	1	1
A_1	36	42	43	70	4	4	4
A_2	25	50	45	80	3	2	2
A_3	28	45	50	75	1	1	1
A_4	24	40	47	100	2	3	3
A_5	30	30	45	80	5	5	5

由于采用所提出模型与SAW方法所得结果十分相似, 可以采用斯皮尔曼等级相关系数分析其排序结果的相似性. 斯皮尔曼等级相关系数是根据排序结果研究两个变量间相关关系的方法^[38-39]. 它反映了两组变量之间的密切程度, 与相关系数 r 一样, 取值在 $-1 \sim +1$ 之间, 不同的是前者根据排序的名次计算. 斯皮尔曼等级相关系数SRCI计算公式如下:

$$SRCI = 1 - \frac{6 \sum D_i^2}{m^3 - m} \tag{18}$$

其中: D_i^2 为两列成对排序的各对排序名次数差, m 为备选方案的个数.

由式(18)可以计算出所提出模型与SAW、TOPSIS方法间的斯皮尔曼等级相关系数SRCI均为98.60%, 即所提出模型与SAW、TOPSIS方法十分相似, 但就偏好反转而言, 所提出模型可以更好地保持排序的相对不变, 因此具有较强的稳定性和可行性. 通过比较各种方法下偏好反转现象的程度, 发现在各种MCDM模型中当加入或删除某选项后, 采用SAW方法所产生的偏好反转现象最弱, 而采用

TOPSIS方法偏好反转问题时常发生,尤其当备选方案很少时,这种现象更为频繁.综合前人研究,可以说所提出的基于TOPSIS方法改进的MCDM方法是可行的且有效的.

检验实例2 如表3所示,决策者需要根据 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 这4个标准在 A_1 、 A_2 、 A_3 中选择最优项,按照基于TOPSIS方法改进的MCDM模型的步骤进行计算,结果如表10所示.即采用所提出模型时, $A_3 > A_2 > A_1$.加入选项 A_4 时,重复上述过程可知排序结果为 $A_3 = A_4 > A_2 > A_1$,如表11所示.同理,删除选项 A_3 后排序结果为 $A_2 > A_1$,如表12所示.

表10 各属性值与最优选项的距离差(实例2)

	V_1	V_2	V_3	V_4	DV_i	排序
A_1	0.2222	0	0.2222	0.1	0.5444	3
A_2	0	0.2222	0	0.2	0.4222	2
A_3	0.0278	0.2222	0.1389	0	0.3889	1

表11 加入选项 A_4 后各属性值与最优选项的距离差

	V_1	V_2	V_3	V_4	DV_i	排序
A_1	0.2222	0	0.2222	0.1	0.5444	3
A_2	0	0.2222	0	0.2	0.4222	2
A_3	0.0278	0.2222	0.1389	0	0.3889	1
A_4	0.1389	0.2222	0.0278	0	0.3889	1

表12 删除选项 A_3 后各属性值与最优选项的距离差

	V_1	V_2	V_3	V_4	DV_i	排序
A_1	0.2222	0	0.2222	0	0.4444	2
A_2	0	0.2222	0	0.1667	0.3889	1

表14 各属性值与最优选项的距离差(实例3)

	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_7	V_8	DV_i	排序
A_1	0.031032	0.056844	0.034026	0.031427	0.038564	0.03685	0.035714	0.032969	0.297425	3
A_2	0.007954	0.085124	0.012913	0.010066	0	0	0	0.010356	0.126414	1
A_3	0.012235	0	0.012399	0.021138	0.119681	0.104769	0.107143	0.001181	0.378546	5
A_4	0	0.029977	0	0	0.050975	0.028179	0.029762	0	0.138894	2
A_5	0.011354	0.010747	0.010143	0.01905	0.094415	0.092486	0.083333	0.020983	0.342511	4

表15 加入选项 A_6 后各属性值与最优选项的距离差

	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_7	V_8	DV_i	排序
A_1	0.031032	0.056844	0.034026	0.031427	0.038564	0.03685	0.035714	0.032969	0.297425	3
A_2	0.007954	0.085124	0.012913	0.010066	0	0	0	0.010356	0.126414	1
A_3	0.012235	0	0.012399	0.021138	0.119681	0.104769	0.107143	0.001181	0.378546	5
A_4	0	0.029977	0	0	0.050975	0.028179	0.029762	0	0.138894	2
A_5	0.011354	0.010747	0.010143	0.01905	0.094415	0.092486	0.083333	0.020983	0.342511	4
A_6	0.028031	0.001697	0.028307	0.035789	0.119681	0.10513	0.107143	0.032593	0.45837	6

将上述结果与AHP方法进行对比,结果如表13所示.由表13可见,当决策者在原选择集中进行选择时,无论是采取所提出方法还是AHP方法,决策者的决策排序均为 $A_3 > A_2 > A_1$.当加入备选方案 A_4 时,采用AHP方法得出的结论为 $A_1 > A_3 = A_4 > A_2$,与原选择集相比, A_1 与 A_3 的顺序发生逆转.采取所提出模型时,很好地避免了偏好反转现象,决策者排序结果仍为 $A_3 = A_4 > A_2 > A_1$,再次证明所提出基于TOPSIS改进的模型有一定的优越之处,它不仅可以在精准地评价各个选项的优劣程度,还可以有效避免偏好反转现象,具有较强的理论意义和现实意义.

表13 所提出模型与AHP方法对比分析

权重 决策标准	1/6	1/3	1/3	1/6	AHP方法	所提出模型
	C_1	C_2	C_3	C_4	排序	排序
A_1	1	9	1	3	3	3
A_2	9	1	9	1	2	2
A_3	8	1	4	5	1	1
A_1	1	9	1	3	1	3
A_2	9	1	9	1	4	2
A_3	8	1	4	5	2	1
A_4	4	1	8	5	2	1
A_1	1	9	1	3	1	2
A_2	9	1	9	1	2	1

检验实例3 根据表4描述的属性值,采用所提出模型进行计算,结果如表14所示.采用所提出模型时, $A_2 > A_4 > A_1 > A_5 > A_3$.加入选项 A_6 重复上述过程,此时排序结果为 $A_2 > A_4 > A_1 > A_5 > A_3 > A_6$,如表15所示.同理,删除选项 A_5 后 $A_2 > A_4 > A_1 > A_5$,如表16所示.

表 16 删除选项 A_5 后各属性值与最优选项的距离差

	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_7	V_8	DV_i	排序
A_1	0.031 032	0.056 844	0.034 026	0.031 427	0.038 564	0.036 85	0.035 714	0.032 969	0.297 425	3
A_2	0.007 954	0.085 124	0.012 913	0.010 066	0	0	0	0.010 356	0.126 414	1
A_3	0.012 235	0	0.012 399	0.021 138	0.119 681	0.104 769	0.107 143	0.001 181	0.378 546	4
A_4	0	0.029 977	0	0	0.050 975	0.028 179	0.029 762	0	0.138 894	2

表 17 所提出模型与VIKOR方法对比分析

属性	+	+	+	+	-	-	-	-	VIKOR方法	所提出模型
属性权重	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	排序	排序
决策标准	Profit	Environmental	Total	Peak	homes	Area	villages	Costs		
A_1	4 184.3	2.41	407.2	251	195	244	15	2 914	5	3
A_2	5 211.9	1.41	501.7	308.3	282	346	21	3 630	4	1
A_3	5 021.3	4.42	504	278.6	12	56	3	3 920.5	2	5
A_4	5 566.1	3.36	559.5	335.3	167	268	16	3 957.9	3	2
A_5	5 060.5	4.04	514.1	284.2	69	90	7	3 293.5	1	4
A_1	4 184.3	2.41	407.2	251	195	244	15	2 914	5	3
A_2	5 211.9	1.41	501.7	308.3	282	346	21	3 630	6	1
A_3	5 021.3	4.42	504	278.6	12	56	3	3 920.5	2	5
A_4	5 566.1	3.36	559.5	335.3	167	268	16	3 957.9	4	2
A_5	5 060.5	4.04	514.1	284.2	69	90	7	3 293.5	1	4
A_6	4 317.9	4.36	432.8	239.3	12	55	3	2 925.9	3	6
A_1	4 184.3	2.41	407.2	251	195	244	15	2 914	4	3
A_2	5 211.9	1.41	501.7	308.3	282	346	21	3 630	3	1
A_3	5 021.3	4.42	504	278.6	12	56	3	3 920.5	1	4
A_4	5 566.1	3.36	559.5	335.3	167	268	16	3 957.9	2	2

表 18 所提出模型与TOPSIS方法对比分析

选项	所提出模型				TOPSIS方法				
	加入 A'_3 前		加入 A'_3 后		加入 A'_3 前		加入 A'_3 后		
	DV	排序	DV	排序	排序	d_i^+	d_i^-	R_i	排序
A_1	0.5729	17	0.5729	18	17	0.1178	0.0344	0.2261	18
A_2	0.5597	16	0.5597	17	16	0.1077	0.0572	0.3468	12
A_3	0.3838	5	0.3838	5	5	0.0865	0.0853	0.4965	5
A_4	0.3892	6	0.3892	7	6	0.087	0.0852	0.4948	7
A_5	0.5395	15	0.5395	16	15	0.1125	0.038	0.2525	17
A_6	0.6106	18	0.6106	19	18	0.1109	0.0599	0.3506	11
A_7	0.2598	1	0.2598	1	1	0.0789	0.0698	0.4696	8
A_8	0.5307	14	0.5307	15	14	0.1041	0.0489	0.3194	15
A_9	0.4765	12	0.4765	13	12	0.0966	0.0487	0.3354	13
A_{10}	0.4242	8	0.4242	9	8	0.0898	0.0539	0.375	10
A_{11}	0.4292	9	0.4292	10	9	0.0666	0.0939	0.5849	2
A_{12}	0.4517	11	0.4517	12	11	0.1151	0.0331	0.2234	19
A_{13}	0.3498	4	0.3498	4	4	0.0681	0.0715	0.5123	4
A_{14}	0.4843	13	0.4843	14	13	0.1005	0.0487	0.3266	14
A_{15}	0.2904	3	0.2904	3	3	0.0684	0.0983	0.5898	1
A_{16}	0.4218	7	0.4218	8	7	0.0884	0.0566	0.3901	9
A_{17}	0.2898	2	0.2898	2	2	0.0723	0.0915	0.5587	3
A_{18}	0.4321	10	0.4321	11	10	0.0994	0.0462	0.3173	16
A'_3	-	-5	0.3838	5	5	0.0865	0.0853	0.4965	5

将上述结果与VIKOR方法进行对比,结果如表17所示.由表17可见:只存在选项 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 、 A_5 时,决策者采用VIKOR方法和所提出方法进行决策时结果存在较大差异.但当加入选项 A_6 和删除选项 A_5 后,采用VIKOR方法会改变选项间的相对顺序,而采用所提出模型可以保持原先排序相对不变,较VIKOR方法更能避免偏好反转问题.

检验实例4 根据表5描述的属性值,分别采用所提出模型和TOPSIS模型进行计算,结果如表18所示.通过对比分析可以发现,使用TOPSIS方法时,加入 A_3 前后选项的顺序发生了较大的改变,而当采用所提出模型时,选项的相对顺序保持不变,表明所提出模型可以最小化偏好反转现象,决策结果也更准确.同样地,对加入备选方案前后排序结果进行斯皮尔曼等级检验.与上文(针对产生相似结果的两种方法相关性的检验)不同的是,这里的等级检验是针对采用同一种方法引起的排序结果差异的相关性.由于 A_3 与 A_3 方案一模一样,可假设加入 A_3 后, A_3 的排序同 A_3 一样(如表18所示).当采用TOPSIS方法时,决策者期望的排序结果与实际排序结果之间的斯皮尔曼系数为49.74%,而采用所提出模型时,决策者期望的排序结果与实际排序结果之间的斯皮尔曼系数为98.86%,表明所提出模型在避免偏好反转问题上较TOPSIS方法更优.

3 结论

在多属性决策方法中,TOPSIS方法是最简单、直接,也是应用最广的一种方法,然而其本身存在一定的缺陷,决策情境的改变容易引起偏好反转,该现象的存在使得决策者无法判断所做出的决策是否正确,容易造成决策失误,尤其当决策者面临的选择问题纷繁复杂时,决策失误可能带来不可估量的损失.因此,对偏好反转问题的研究无论是在理论上还是在实际应用中都是很有意义的.本文所提出的基于TOPSIS方法改进的MCDM模型不仅计算简单,而且可以较好地测度选项间的差异,排除了其他因素的干扰,使决策结果更准确更明晰.面对同一决策问题,将该模型的计算结果与SAW、AHP、TOPSIS和VIKOR方法进行对比分析,发现只存在原选项时,所提出的模型与SAW、AHP方法的排序结果一致,当添加或删除某个选项时,其他方法都会产生不同程度的偏好反转现象,而本文所提出的基于TOPSIS改进的模型可以保持选项的相对顺序不变或发生较小的偏好反转,且可以最小化偏好反转的程度.通过对一系列决策问题的分析发现,所提出的模型不仅是有效的、可靠的,而

且在避免偏好反转问题时较SAW、AHP、TOPSIS和VIKOR方法具有一定的优越性.

参考文献(References)

- [1] Bairagi B, Dey B, Sarkar B, et al. A De Novo multi-approaches multi-criteria decision making technique with an application in performance evaluation of material handling device[J]. Computers & Industrial Engineering, 2015, 87: 267-282.
- [2] Frini A, Guitouni A, Martel J M. A general decomposition approach for multi-criteria decision trees[J]. European Journal of Operational Research 2012, 220(2): 452-460.
- [3] 张美璟, 王应明, 陈圣群, 等. 考虑偏好反转的区间不确定多属性决策方法[J]. 控制与决策, 2016, 31(11): 2019-2024.
(Zhang M J, Wang Y M, Chen S Q, et al. Approach for multiple attribute decision making under interval uncertainty considering preference reversal[J]. Control and Decision, 2016, 31(11): 2019-2024.)
- [4] García-Cascales M S, Lamata M T. On rank reversal and TOPSIS method[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2012, 56(5/6): 123-132.
- [5] Macharis C, Springael J, Brucker K D, et al. PROMETHEE and AHP: The design of operational synergies in multicriteria analysis[J]. European Journal of Operational Research, 2004, 153(2): 307-317.
- [6] Verly C L, De Smet Y. Some results about rank reversal instances in the PROMETHEE methods[J]. International Journal of Multicriteria Decision Making, 2013, 3(4): 325-345.
- [7] Wang Y M, Luo Y. On rank reversal in decision analysis[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2009, 49(5/6): 1221-1229.
- [8] Behzadian M, Kazemzadeh R B, Albadvi A, et al. Promethee: A comprehensive literature review on methodologies and applications[J]. European Journal of Operational Research, 2010, 200(1): 198-215.
- [9] Barzilai J, Golany B. Ahp rank reversal, normalization and aggregation rules[J]. Information Systems and Operational Research, 1994, 32(2): 57-64.
- [10] Senouci M A, Mushtaq M S, Hoceini S, et al. TOPSIS-based dynamic approach for mobile network interface selection[J]. Computer Networks, 2016, 107: 304-314.
- [11] Jahan A, Edwards Kevin L. A state-of-the-art survey on the influence of normalization techniques in ranking: Improving the materials selection process in engineering design[J]. Materials & Design, 2015, 65: 335-342.
- [12] Costa C A B E, Vansnick J C. A critical analysis of the eigenvalue method used to derive priorities in AHP[J]. European Journal of Operational Research, 2008, 187(3): 1422-1428.
- [13] AL Salem A A, Awasthi A. Investigating rank reversal in reciprocal fuzzy preference relation based on additive consistency: Causes and solutions[J]. Computers &

- Industrial Engineering, 2018, 115: 573-581.
- [14] Ishizaka A, Labib A. Review of the main developments in the analytic hierarchy process[J]. *Expert Systems with Applications*, 2011, 38(11): 14336-14345.
- [15] Saaty T L, Vargas L G. The legitimacy of rank reversal[J]. *Omega*, 1984, 12(5): 513-516.
- [16] Anbaroglu B, Heydecker B, Cheng T. Spatio-temporal clustering for non-recurrent traffic congestion detection on urban road networks[J]. *Transportation Research, Part C: Emerging Technologies*, 2014, 48: 47-65.
- [17] Salem A A A, AWasthi A. Investigating rank reversal in reciprocal fuzzy preference relation based on additive consistency: Causes and solutions[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2018, 115: 573-581.
- [18] Dey B, Bairagi B, Sarkar B, et al. Multi objective performance analysis: A novel multi-criteria decision making approach for a supply chain[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2016, 94: 105-124.
- [19] Velasquez M, Hester P. An analysis of multi-criteria decision making methods[J]. *International Journal of Operations Research*, 2013, 10(2): 56-66.
- [20] Behzadian M, Otagh Sara S K, Yazdani M, et al. A state-of-the-art survey of TOPSIS applications[J]. *Expert Systems with Applications*, 2012, 39(17): 13051-13069.
- [21] Salih M M, Zaidan B B, Zaidan A A, et al. Survey on fuzzy TOPSIS state-of-the-art between 2007 and 2017[J]. *Computers & Operations Research*, 2019, 104: 207-227.
- [22] Goyal T, Kaushal S. Handover optimization scheme for LTE-Advance networks based on AHP-TOPSIS and Q-learning[J]. *Computer Communications*, 2019, 133: 67-76.
- [23] Pramanik D, Haldar A, Mondal S C, et al. Resilient supplier selection using AHP-TOPSIS-QFD under a fuzzy environment[J]. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 2017, 12(1): 45-54.
- [24] Wu Z B, Xu J P, Jiang X L, et al. Two MAGDM models based on hesitant fuzzy linguistic term sets with possibility distributions: VIKOR and TOPSIS[J]. *Information Sciences*, 2019, 473: 101-120.
- [25] Wang Z G, Hao H, Gao F, et al. Multi-attribute decision making on reverse logistics based on DEA-TOPSIS: A study of the shanghai end-of-life vehicles industry[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 214: 730-737.
- [26] Aires R F D, Ferreira L. A new approach to avoid rank reversal cases in the TOPSIS method[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, 132: 84-97.
- [27] Ren L, Zhang Y, Wang Y, et al. Comparative analysis of a novel M-TOPSIS method and topsis[J]. *Applied Mathematics Research Express*, 2010, DOI: 10.1093/amrx/abm005.
- [28] Lahby M, Cherkaoui L, Adib A. An enhanced-TOPSIS based network selection technique for next generation wireless networks[C]. *The 20th International Conference on Telecommunications (ICT)*. Piscataway: IEEE, 2013: 1-5.
- [29] Dezert J, Han D Q, Yin H L. A new belief function based approach for multi-criteria decision-making support[C]. *International Conference on Information Fusion*. Piscataway: IEEE, 2016: 782-789.
- [30] Wang P, Zhu Z Q, Wang Y H. A novel hybrid MCDM model combining the SAW, TOPSIS and GRA methods based on experimental design[J]. *Information Sciences*, 2016, 345: 27-45.
- [31] 陈伟. 关于TOPSIS法应用中的逆序问题及消除的方法[J]. *运筹与管理*, 2005, 13(3): 39-43.
(Chen W. On the problem and elimination of rank reversal in the application of TORSIS method[J]. *Operations Research and Management Science*, 2005, 14(3): 39-43.)
- [32] 李保珍, 封胜杰. 基于用户选择的产品属性权重确定及对TOPSIS法的改进[J]. *运筹与管理*, 2017, 26(3): 54-62.
(Li Z B, Feng S J. Determination of product attribute weight and improvement of OPSIS method based on users selection[J]. *Operations Research and Management*, 2017, 26(3): 54-62.)
- [33] Guo Y H, Zhou W J, Luo C Y, et al. Instance-based credit risk assessment for investment decisions in P2P lending[J]. *European Journal of Operational Research*, 2016, 249(2): 417-426.
- [34] Vega A, Aguarón J, García-Alcaraz J, et al. Notes on dependent attributes in TOPSIS[J]. *Procedia Computer Science*, 2014, 31: 308-317.
- [35] Cables E, Lamata M, Verdegay J. Rim-reference ideal method in MCDM[J]. *Information Sciences*, 2016: 1-10.
- [36] Dyer J S. Remarks on the analytic hierarchy process[J]. *Management Science*, 1990, 36(3): 249-258.
- [37] Opricovic S, Tzeng G H. Extended VIKOR method in comparison with outranking methods[J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 178(2): 514-529.
- [38] Mousavi-Nasab S H, Sotoudeh-Anvari A. A comprehensive MCDM-based approach using TOPSIS, COPRAS and DEA as an auxiliary tool for material selection problems[J]. *Materials & Design*, 2017, 121: 237-253.
- [39] Mousavi-Nasab S H, Sotoudeh-Anvari A. A new multi-criteria decision making approach for sustainable material selection problem: A critical study on rank reversal problem[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 182: 466-484.

作者简介

王宗润(1973—), 男, 教授, 博士生导师, 从事金融工程与风险管理、互联网金融等研究, E-mail: zrwang0209@sina.com;

汤小芸(1993—), 女, 硕士生, 从事行为金融、投资决策的研究, E-mail: 841043780@qq.com.

(责任编辑: 郑晓蕾)